

南海南部曾母盆地中新世碳酸盐岩的层序地层

杨楚鹏¹, 姚永坚^{1*}, 李学杰¹, 常晓红²

1. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东广州 510760

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

摘要: 利用钻井和二维地震资料, 对曾母盆地南康台地以及 L 构造中新统碳酸盐建造的三级层序发育特征进行解剖, 归纳总结研究区碳酸盐岩层序发育模式, 认为曾母盆地在中中新世—晚中新世 (5.3~16 Ma) 期间发育 3 期较大规模的碳酸盐岩沉积旋回, 在地层上可将其划分为 3 个三级层序, 即 SQ1、SQ2 和 SQ3 层序。其中 SQ1 与 SQ3 应该属于经典 I 型碳酸盐岩层序, 在其岩性上由低位域的致密藻灰岩沉积、水进域的泥质灰岩和高位域的珊瑚灰岩组合构成, 代表了从开阔海沉积环境过渡至礁滩相沉积环境的发育过程; 而 SQ2 应属于淹没不整合型碳酸盐岩层序, 以泥质灰岩凝缩层+高位域的珊瑚灰岩或碎屑灰岩序列组合为特征, 其发育基本处于水体环境持续变浅的沉积环境中。

关键词: 层序模式; 碳酸盐岩建造; 中新世; 曾母盆地; 沉积; 地层学。

中图分类号: P539.2

文章编号: 1000-2383(2014)01-0091-08

收稿日期: 2013-03-29

Sequence Stratigraphy and Sedimentary Cycle of Miocene Carbonate Buildups in Zengmu Basin, the Southern South China Sea

Yang Chupeng¹, Yao Yongjian^{1*}, Li Xuejie¹, Chang Xiaohong²

1. Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land & Resources, Guangzhou 510760, China

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: In this study, the Miocene carbonate sequence stratigraphy and sedimentary cycle of Nankang platform and L-structure in Zengmu basin are analyzed by using drilling, seismic and some palaeontologic data, and the sequence pattern of Miocene carbonate in the study area is established. The results show that three large-scale carbonate sedimentary cycles occurred during Mid to Late Miocene (5.3–16 Ma) in Zengmu basin, so the strata can be subdivided into three Tertiary sequences (SQ1, SQ2 and SQ3 sequences). SQ1 and SQ3 sequences are defined as the classical type I carbonate sequences, which are composed of dense algal limestone in low-stand system tracts (LST), argillaceous limestone in transgressive system tracts (TST) and coral limestone in high-stand system tracts (HST). And their properties indicate that the carbonate buildups have experienced a process from open marine platform facies to reef flat facies. Being different from SQ1 and SQ3 sequences, SQ2 sequences belong to the drowned unconformity type of carbonate sequences. This kind of carbonate sequences is marked by the successions consisted of argillaceous limestone of condensed sequence (CS) and coral limestone (or clastic limestone) of HST. And its development generally occurred during the phase of continuous decrease of sea level.

Key words: sequence pattern; carbonate buildup; Miocene; Zengmu basin; sedimentology; stratigraphy.

曾母盆地主体位于巽他陆架之上, 西邻纳土纳隆起, 东接文莱—沙巴盆地, 北邻南沙隆起西南端, 南接加里曼丹岛, 盆地总面积约 $17 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主体呈 EW 向展布。曾母盆地可划分出 8 个构造单元,

自西向东为索康坳陷、拉奈隆起、西部斜坡、塔陶垒堦、康西坳陷、西巴林隆起、东巴林隆起和南康台地(图 1)。曾母盆地是在曾母地体(南沙块体的一部分)与巽他地体(印支块体一部分)相汇聚的大地

基金项目: 东南亚地区油气地质综合研究与区域优选项目 (No. GT-YQ-QQ-1-02)。

作者简介: 杨楚鹏 (1980—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋油气地质综合研究。E-mail: gmgs_yang@foxmail.com

* 通讯作者: 姚永坚, E-mail: yjyao64@yahoo.com.cn

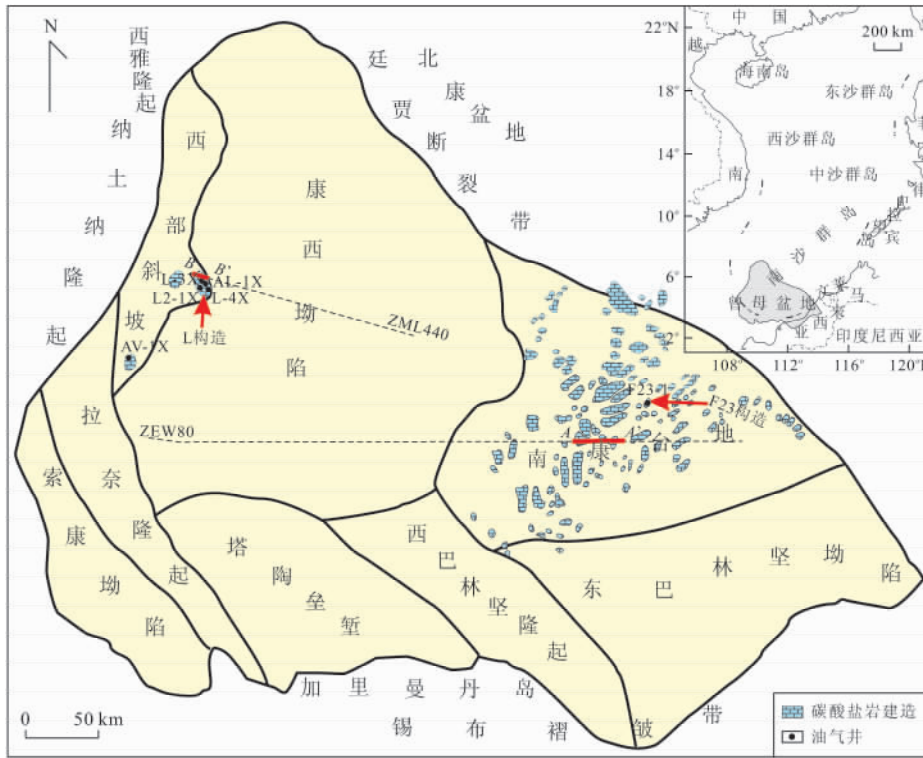


图 1 曾母盆地构造单元划分及碳酸盐岩建造展布(碳酸盐岩分布来自于 Epting,1980;May and Eyles,1985)

Fig. 1 Tectonic subdivision and distribution of the major carbonate platforms in Zengmu basin

构造背景上形成,作为前新生代变质岩基底上发育起来的大型新生代沉积盆地,具有面积大、沉积速率快、沉积厚度大的特点(姚永坚等,2008).

由于所采集的资料以及角度的不同,曾母盆地新生代沉积地层尚无统一的划分方案,不同学者定义不整合面时代和层序存在差异(孙珍等,2011;周蒂等,2011;姚永坚等,2013).本文采用了姚永坚等(2013)最新发表的地震地层划分方案,本研究所涉及的中新世地层具有 4 个大型不整合界面,分别为: T₁ 界面(5.3 Ma),为上新统与中新统的分界; T₂ 界面(11.6 Ma),为中中新统与上中新统的分界,对应于南沙造山运动; T₃ 界面(16.0 Ma),为下中新统与中中新统的分界,对应于南海海底扩张停止(沙巴造山运动),标志着曾母盆地从周缘前陆向被动大陆边缘性质的转变; T₃¹ 界面(23.0 Ma),为渐新统与中新统的分界,对应于南海运动(南海扩张轴的跃迁)(图 2).

南海南部及整个东南亚地区从渐新世早期开始发育碳酸盐岩沉积,中中新世—晚中新世达到鼎盛(Epting,1989;Wilson,2002).从目前的曾母盆地及周边地区的油气勘探现状来看,大型油气田均发现于中中新统一上中新统的碳酸盐岩储集体中,包括

马来西亚在南康台地(国外称“中卢科尼亚碳酸盐岩台地”)开发的生物礁型油气田群(大约 200 个碳酸盐岩建造,天然气探明储量约 $1.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$)(Epting,1980,1989;Vahrenkamp,1998a,1998b),以及印度尼西亚开发的 L 大气田(位于曾母盆地西部斜坡带)(Sangree,1981;May and Eyles,1985)(图 1).可见,曾母盆地碳酸盐岩的研究对该地区油气勘探意义重大;另外,新生代以来南海南部碳酸盐岩建造的发育演化同样是了解南海古气候变迁、海平面变化以及沉积古环境演变的重要窗口,有重要的科学研究价值.然而,由于政治、外交因素的限制,以及国内缺乏该区域的钻井、三维地震资料,针对该区域的碳酸盐岩研究鲜有文献报道,尤其是对中新世碳酸盐岩的层序地层学、沉积学的研究尚属空白.本文利用广州海洋地质调查局历年在曾母盆地采集的二维地震资料,结合已有的国外钻井资料,在进行研究区碳酸盐岩层序格架研究的基础上,对南康台地以及 L 构造碳酸盐建造内部的发育特征进行解剖,归纳总结研究区碳酸盐岩层序发育模式,以期能为研究区乃至整个南海南部地区的碳酸盐岩建造的沉积演化研究以及碳酸盐岩油气藏的勘探提供有益的参考.

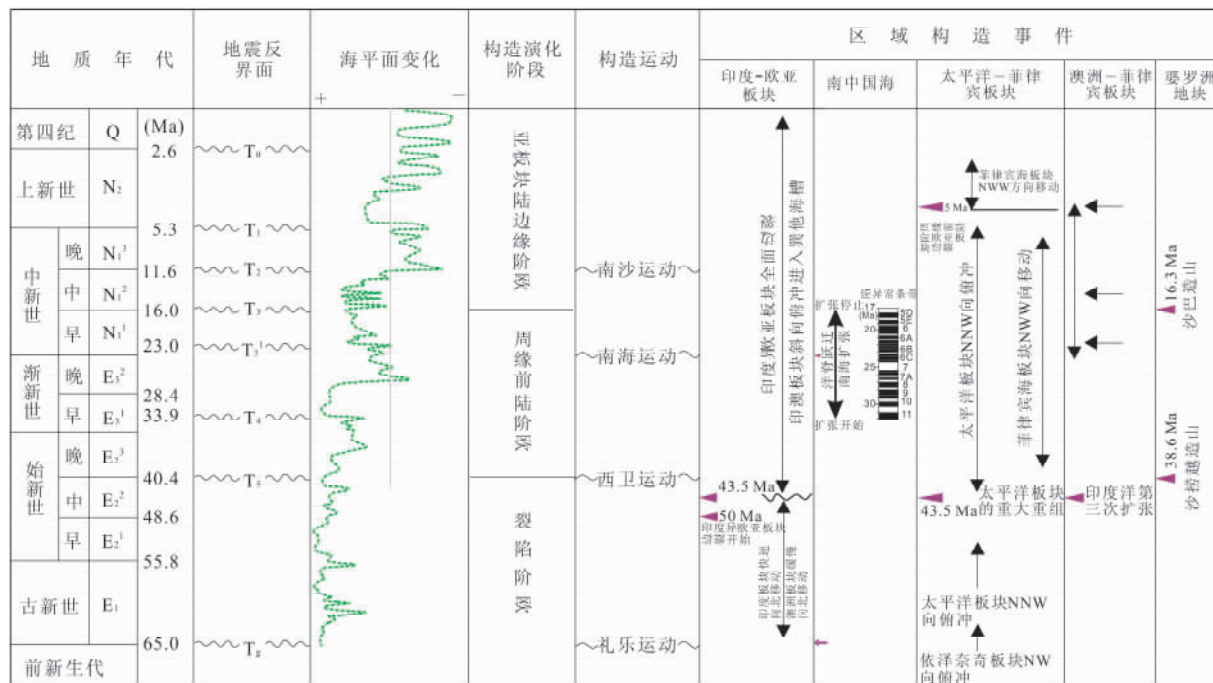


图 2 南海南部新生界主要地震反射界面及区域构造背景(姚永坚等,2013)

Fig. 2 The Cenozoic seismic reflection interfaces and regional tectonic in the Southern SCS

1 碳酸盐岩建造的单井层序地层分析

本研究将利用曾母盆地南康台地的 F23 构造的 F23-1 井来进行单井的层序地层分析. F23 构造距离沙捞越(Sarawak)沿岸 200 km,水深 85 m,为一个 NE-SW 走向的中新世碳酸盐岩建造,面积约为 22 km²(Leong *et al.*, 1995). 1983 年壳牌石油公司对其进行了钻探,同年 10 月开始生产,以天然气和凝析油产出为主,可采储量约 91.84 × 10⁶ (吨油当量). F23-1 井位于 F23 构造中部,其未钻穿 T₃ 界面(中中新统底界),壳牌石油公司曾经利用密度测井、声波测井、自然伽马测井等手段对其碳酸盐岩的储集性能进行过详细研究(Ali and Abolins, 1999).

1.1 层序界面的识别和层序划分

Zampetti *et al.* (2004) 利用南康台地某碳酸盐岩建造的高精度三维地震和测井资料,对其碳酸盐岩建造内部结构特征进行了较为细致的研究工作,从碳酸盐岩沉积体内部成功识别出碳酸盐岩沉积旋回,以及最大海泛界面. 对比其研究结果,利用 F23-1 井的钻井资料对南康台地 F23 构造的碳酸盐岩沉积进行精细的层序地层分析,可从 F23-1 井中识别出明显的碳酸盐岩沉积旋回期次以及层序界面. 图 3 给出了 F23-1 井完整的碳酸盐岩沉积旋回的层序分析结果. 通过对测井曲线及岩性特征的综合对比

分析,可对中中新统一上中新统的碳酸盐岩沉积划分出 3 个三级碳酸盐岩层序(层序 SQ1、SQ2 和 SQ3);并可进一步对每个三级层序中碳酸盐岩的发育状态进行分析,从而进行体系域的划分.

单元层序的叠置样式反映了沉积旋回模式,并以暴露剥蚀面(层序界面)、沉积间断面(层序界面)和最大海泛面(mfs)来划分,暴露剥蚀面在钻井上极易识别. 在中中新世末 11.6 Ma 左右,南海南部经历了南沙运动和全球海平面下降事件,海平面急剧下降,南海南部普遍遭受剥蚀,区域上形成 T₂ 不整合界面,该界面在 F23-1 井中为 SQ2 和 SQ3 层序的分界面,即 S2 层序界面. 研究区在中中新世时为相对海平面缓慢波动式上升时期,海水环境极利于造礁生物的生长,为碳酸盐岩建造稳定发育时期,但该时期并非只有一次碳酸盐岩的发育旋回. 从 F23-1 井单井分析来看,其间应有两次较为明显的海进—海退旋回,即两个碳酸盐岩的沉积层序(SQ1 和 SQ2),但两次旋回中并不存在明显的剥蚀性不整合界面. 为此,笔者引入“淹没不整合”的概念来定义 S21 层序界面,该界面的厘定将在下文重点讨论.

根据 F23-1 井单井分析, SQ1 和 SQ3 层序碳酸盐岩沉积经历了完整的 3 个发育阶段,具有 3 个完整的体系域组成. 其低位域和高位域均由进积、加积准层序组组成,发育一套较纯的碳酸盐岩沉积;海进

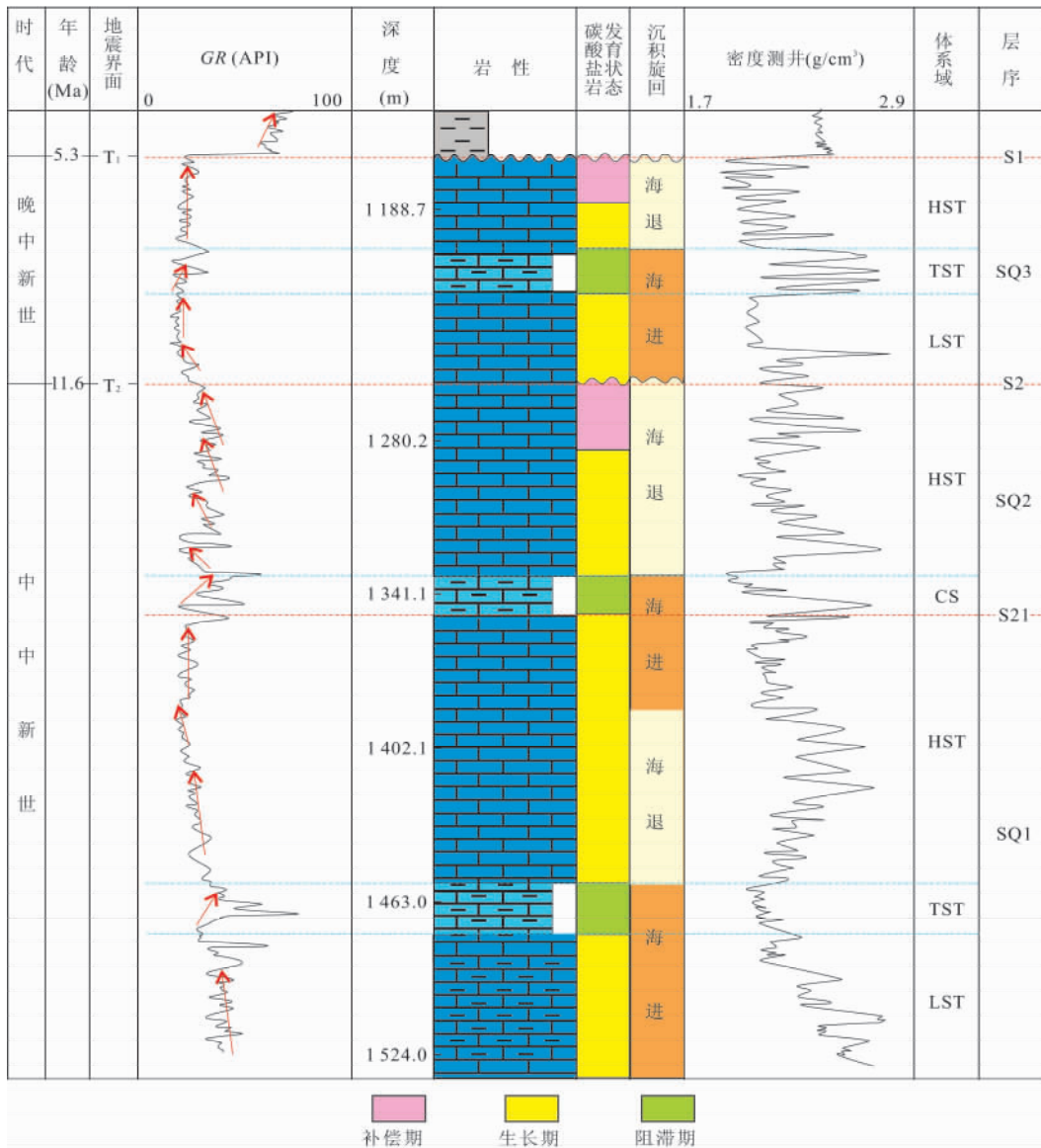


图 3 曾母盆地南康台地 F23-1 井中新统碳酸盐岩层序特征分析(钻井位置见图 1,岩性资料来自 Ali and Abolins,1999)

Fig. 3 Depositional and sequence stratigraphic property as observed in the F23-1 well of Nankang platform

体系域为一套退积型准层序组,为碳酸盐岩台地发育的滞阻期,岩性为一套薄层泥灰岩层. SQ2 层序类型与以上两种不同,下文中将重点讨论.

1.2 淹没型层序界面——S21 层序界面属性的厘定

传统层序地层学的开创者 Vail *et al.* (1991)定义两类经典层序类型:I型(低位体系域+海进体系域+高位体系域)和II型(陆棚边缘域+海进体系域+高位体系域)层序,其主要是根据暴露间断面的类型而提出.随着旋回地层学的兴起,相继有学者提出“淹没不整合面”概念(Schlager,1981).随后,Goldhammer *et al.* (1990)将“淹没不整合面”(或加深饥饿间断面)定义为地层记录中的另一种类型间断面,从而定义了第 3 种

类型的层序,即凝缩层+高位体系域.在某些情况下,碳酸盐岩层序形成于三级海平面变化旋回的海平面上升时期,即水深快速加深过程中.假如海水加深过大,造成碳酸盐岩生产速率的降低或停止,就将造成碳酸盐台地的淹没事件,该事件本身就是造成水下碳酸盐岩沉积间断的原因,形成淹没不整合面.这种以淹没不整合面为层序界面的淹没不整合面型层序,被认为是碳酸盐地层层序中的一种典型类型(Goldhammer *et al.*,1990).淹没不整合型碳酸盐岩层序,以总体向上变浅的非对称相序为特征,凝缩段直接覆盖于层序界面上,不必含有任何暴露标志(梅冥相,1996).该类型层序在我国南方古生界地层中广泛发育,对其发育特征已有较为详尽的研究(Mei *et al.*,

2003,2007).

从全球海平面变化的角度来考察,整个中中新世南海南部海平面处于一个相对稳定的缓慢上升时期,该时期的两次碳酸盐岩旋回之间应该不存在相对海平面极度下降而造成的剥蚀面的存在.换言之,即 SQ1 与 SQ2 层序间的 S21 层序界面并非传统意义上暴露形成的构造不整合面.引入淹没不整合的概念将较为合理地解释 F23-1 井中 SQ2 层序发育特征.在相对海平面上升期间,由于海平面快速上升,导致造礁生物生长缓慢后停滞,碳酸盐岩沉积受阻,产生淹没事件而形成下部凝缩段沉积,在该凝缩段直接覆盖在下伏层序的高水位体系域单元上,两者之间即为一个淹没不整合面;随后,海平面上升速度变慢而进入停滞期或下降期,碳酸盐生产速率和堆积速率逐渐增大,从而沉积由浅水碳酸盐沉积构成的高水位体系域.在前一阶段,地层序列多以退积序列为特征;在后一阶段,以加积作用和进积作用为特征(图 3).两个阶段叠加在一起即形成一个能反映长周期三级海平面变化过程的非对称相序.

2 碳酸盐岩地震层序地层特征

对于南康台地碳酸盐岩地层而言,SQ1 与 SQ2 层序发育的中中新世是碳酸盐岩地台稳定发育阶

段,其发育于代表南海张裂结束的区域破裂不整合 T₃ 界面(S3 层序界面)之上,分布范围较广,厚度稳定;T₂ 界面(S2 层序界面)对应于南沙运动和全球海平面下降事件,削截、上超特征明显,极易识别;SQ1 与 SQ2 层序地震相特征为台滩状外形,内部为中强振幅、中高连续反射,具平行—亚平行结构,其代表了水环境相对稳定的碳酸盐岩沉积;其间的 S21 层序界面识别难度较大,通常表现为一组连续性较好的强相位,并常介于上下空白、杂乱反射层之间,但不具有削截、上超特征;SQ3 层序为下伏稳定碳酸盐岩台地之上的一套生物礁相的沉积,地震相特征为中频,中—弱振幅、中连续—断续连续反射,外形显丘形,顶部为高连续双相位强反射,周围反射同相轴向台顶部上超的特点(图 4).

曾母盆地西部斜坡带 L 构造碳酸盐岩沉积同样发育较为完整,May and Eyles(1985)利用 L-2X 钻井岩心资料对其碳酸盐岩内部交错层理的倾向进行分析,结果表明中中新统一上中新统碳酸盐岩层段中至少存在 3 期碳酸盐岩沉积旋回,其中前 1、2 期为碳酸盐岩台地发育阶段,第 3 期为台地边缘生物礁发育阶段.通过对穿过 L 构造的 ZML440 地震测线的层序地层学分析,同样可以清楚地解释出 3 个碳酸盐岩层序(图 5).碳酸盐岩台地地震相特征表现为中频,中—弱振幅、中连续—断续连续反射,具平行—亚平行结构,外形显台形,顶部为高连续双

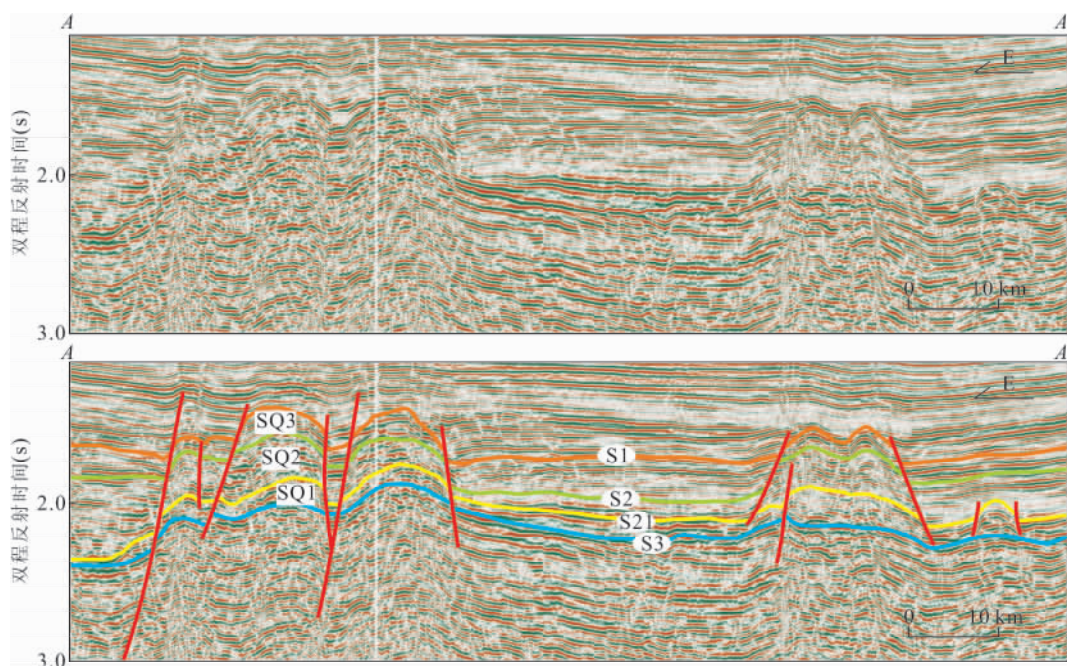


图 4 曾母盆地南康台地中新统碳酸盐岩地层地震反射特征及解释结果(测线位置见图 1)

Fig. 4 Seismic reflection characteristics and interpretation results of Miocene carbonate in Nankang platform

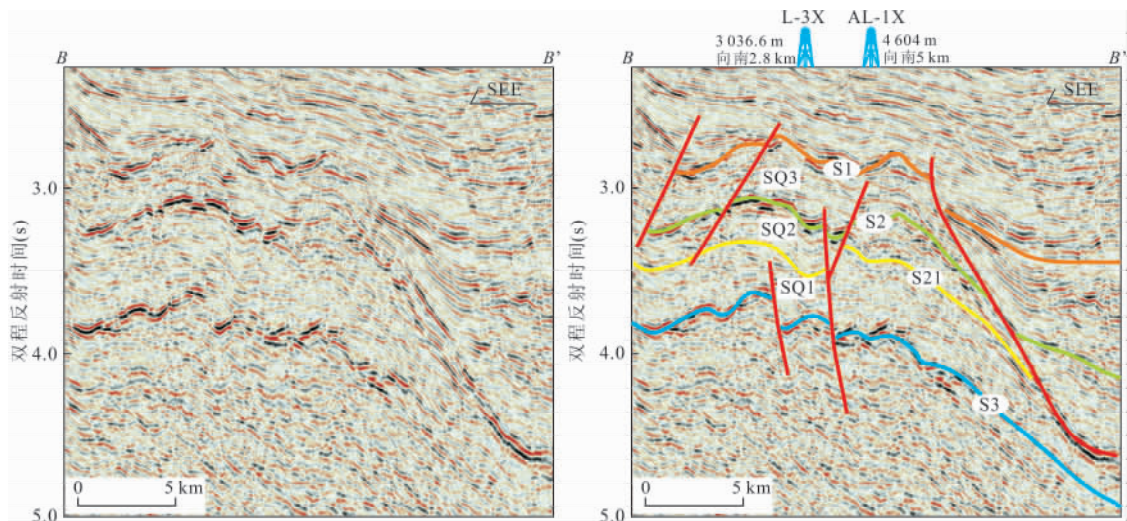


图 5 曾母盆地 L 构造中新统碳酸盐岩地层地震反射特征及解释结果(测线位置见图 1)

Fig. 5 Seismic reflection characteristics and interpretation results of Miocene carbonate in L-structure

相位强反射,周围反射同相轴向台顶部上超的特点;台地之上发育的生物礁相沉积在地震剖面上显示为丘状反射体,内部弱振幅,杂乱状地震相。S1、S2 和 S3 层序界面反射特征明显,同相轴连续清晰,削截、上超特征突出;S21 层序界面特征不十分明显,但尚可识别。以上特征和发育时代与南康台地碳酸盐岩发育特征基本相似,可以断定为同一时期在不同构造部位上的产物。

3 碳酸盐岩层序地层及沉积模式

综合对比南康台地与 L 构造碳酸盐岩层序地层分析结果,结合钻井岩性资料(L 构造上的 L-2X 井、AL-1X 井和 L-3X 井),以 L 碳酸盐岩建造为解剖对象,归纳研究区中中新统一上中新统碳酸盐岩层序地层及沉积模式(图 6)。该模式在研究区及整个南海南部地区具有普遍意义,其具有如下特征。

(1)每次沉积旋回的碳酸盐岩发育都有海进和海退沉积序列组成,并且包含 3 个基本的碳酸盐岩发育阶段(Ali and Abolins, 1999)(图 3):生长期阶段对应于相对海平面上升期或下降期。该阶段是碳酸盐岩台地发育的黄金时期,水深条件极其适宜造礁生物的生长,礁体发育迅速,沉积的碳酸盐岩岩性较纯;阻滞期为最大的海泛时期。该阶段由于水深较深,不利于造礁生物生长,碳酸盐岩沉积非常缓慢甚至停滞,此时的沉积物中泥质含量明显增多,一般为泥质碳酸盐岩沉积;补偿期阶段为相对海平面下降的后段,在海平面下降到最低时,礁体出露,遭到风

化剥蚀,碳酸盐岩发育进入暴露期而终止。

(2)在中中新世—上中新世(5.3~16 Ma)期间,曾母盆地乃至整个南沙地区发育 3 期较大规模的碳酸盐岩沉积层序,即中中新世发育的 SQ1 和 SQ2 层序及晚中新世发育的 SQ3 层序;中中新世为碳酸盐岩台地发育期,该时期沉积的碳酸盐岩地层厚度较大,延伸范围较广,在整个南海南部地区分布较为普遍;而晚中新世时期则主要以台地边缘生物礁体发育为主。

(3)层序 SQ1 和 SQ2 之间以淹没不整合接触,钻井上以泥质含量较高的泥灰岩段的出现为其标志性特征,地震剖面上表现为一组连续性较好的强相位,具有较强的反射能量,并常介于上下空白、杂乱反射层之间,相对应海平面上升期;SQ2 与 SQ3 层序之间不整合接触明显,钻井上表现为明显的测井曲线突变面,在地震剖面上该界面有明显的削截、上超等构造不整合特征,该界面所对应的时代为晚中新世初期全球海平面下降时期;SQ1 与 SQ3 应该属于经典 I 型碳酸盐岩层序,而 SQ2 应属于淹没不整合型碳酸盐岩层序。

(4)对国外钻井资料的分析表明,碳酸盐岩台地在 SQ1 层序旋回中发育稳定,其位于致密的下中新统泥页岩之上,低位域以致密蓝藻灰岩沉积为主,表现为开阔海沉积环境;向上经一段泥质含量较高的密集段之后,过渡至以有孔虫、珊瑚灰岩为主的高位域沉积,表明此时处于一种礁滩相沉积环境中(包括礁前、礁后以及泻湖相环境);但此时的礁滩相沉积发育并不充分(台缘碎屑灰岩不发育);并且礁滩沉

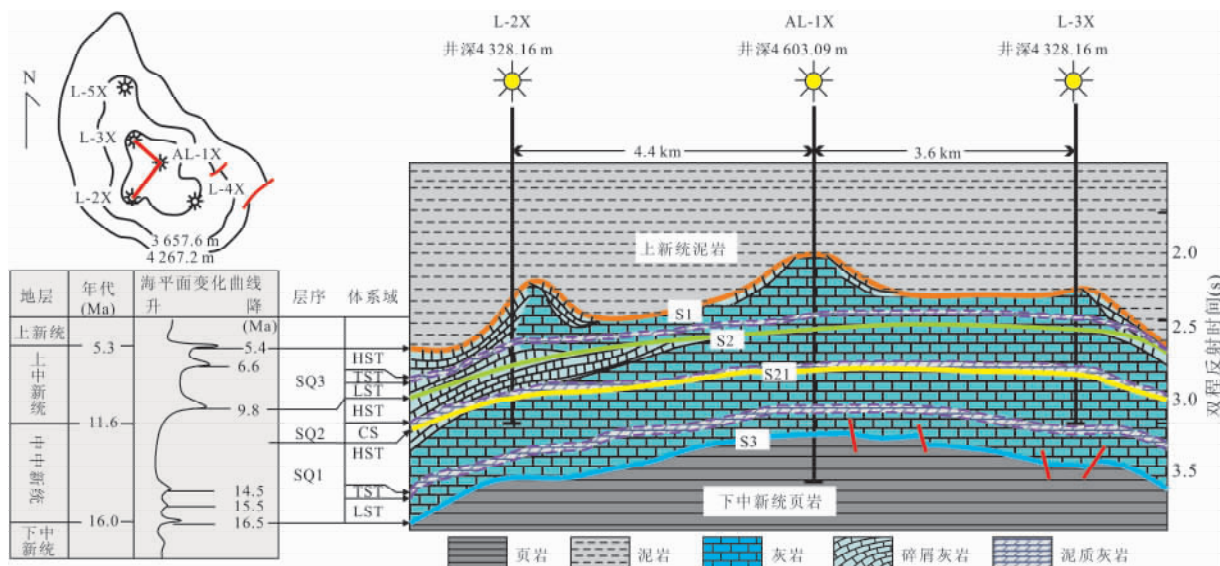


图 6 曾母盆地中新统碳酸盐岩层序地层及沉积模式(据 May and Eyles(1985)中剖面修改)

Fig. 6 The sequence pattern of Miocene carbonate in Zengmu basin

积未暴露于水体之上遭受剥蚀,随即相对海平面快速上升而发生淹没事件,SQ2 层序旋回开始. SQ2 层序以凝缩层+高位体系域序列组合为特征,即泥质灰岩之上覆盖珊瑚灰岩和(或)碎屑灰岩;SQ2 层序旋回中的礁滩相高位域沉积得以充分发育,在台缘发育大量由浪击、风化、剥蚀产生的碎屑灰岩,随着中中新世末—晚中新世早期的南沙运动和全球性海退事件的共同影响,稳定的碳酸盐岩台地发育期结束. 随后的 SQ3 层序旋回则是在碳酸盐岩台地之上发育的台缘生物礁沉积,这些礁体的发育模式、大小以及分布主要受控于台地地形、所处位置以及季风条件等因素,有塔礁、台礁等形态;季风气候条件使得生物礁在迎风一侧形成陡坡,由于浪击作用而堆积大量碎屑灰岩,而背风一侧则为缓坡,这些不同的翼部形态以及构造特征在地震剖面上呈现很强的反射特征(图 4,图 5).

4 结论

曾母盆地在中中新世—晚中新世(5.3~16 Ma)期间发育 3 期较大规模的碳酸盐岩沉积旋回,其发生、发展与区域构造运动以及海平面变化密切相关,在地层上可将其划分为 3 个三级层序,即 SQ1、SQ2 和 SQ3 层序. 其中 SQ1 与 SQ3 应该属于经典 I 型碳酸盐岩层序,在海进—海退旋回中经历了一套较完整发育阶段(包括生长期、阻滞期、补偿期以及暴露期);岩性由低位域的致密藻灰岩沉积、

水进域的泥质灰岩和高位域的珊瑚灰岩组合构成,代表了从开阔海沉积环境过渡至礁滩相沉积环境的发育过程. 而 SQ2 应属于淹没不整合型碳酸盐岩层序,以泥质灰岩凝缩层+高位域的珊瑚灰岩或碎屑灰岩序列组合为特征,其发育基本处于水体环境持续变浅的沉积环境中.

致谢:感谢中国地质大学(武汉)解习农教授、任建业教授、姜涛副教授和佟殿君讲师在该工作进行其间给予的指导.

References

Ali, M. Y. B., Abolins, P., 1999. Chapter 15: Central Luconia Province. In: Leong, K. M., ed., *The Petroleum Geology and Resources of Malaysia*. Petronas, Kuala Lumpur, 369—392.

Epting, M., 1980. Sedimentology of Miocene Carbonate Buildups, Central Luconia, Offshore Sarawak. *Geological Society of Malaysia, Bulletin*, 12: 17—30.

Epting, M., 1989. The Miocene Carbonate Buildups of Central Luconia, Offshore Sarawak. In: Bally, A. W., ed., *Atlas of Seismic Stratigraphy*. AAPG Studies in Geology, Tulsa, 168—173.

Goldhammer, R. K., Dunn, P. A., Hardie, L. A., 1990. Depositional Cycles, Composite Sea-Level Changes, Cycle Stacking Patterns, and the Hierarchy of Stratigraphic Forcing. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 102(5): 535—562. doi: 10.1130/0016-7606(1990)102<0535: DCCSLC>2.3.CO;2

Leong, S. M. S., Ling, L. S., Wong, K. U. S., et al., 1995.

- The Depletion Behavior of the F23 Gas Field (East Malaysia)—Integrated Studies on History-Matching Dynamic Data. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference, Kuala Lumpur, Malaysia.
- May, J. A., Eyles, D. R., 1985. Well Log and Seismic Character of Tertiary Terumbu Carbonate, South China Sea, Indonesia. *AAPG*, 69(9): 1339—1358.
- Mei, M. X., 1996. The Third-Order Carbonate Cyclic Sequences of Drowned Unconformity Type with Discussions on “Condensation” of Carbonate Platforms. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 16(6): 24—33 (in Chinese with English abstract).
- Mei, M. X., Ma, Y. S., Deng, J., et al., 2003. Sedimentary Facies Architectures of the Third-Order Sequences and the Sequence-Stratigraphic Framework from the Early to the Middle Epoch of Triassic in the Nanpanjiang Basin. *Journal of China University of Geosciences*, 14(2): 103—118.
- Mei, M. X., Ma, Y. S., Zhang, H., et al., 2007. From Basin Black-Shales to Platform Carbonate Rocks: A Study on Sequence Stratigraphy for the Lower Cambrian of the Upper-Yangtze Region in South China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 81(5): 739—755. doi: 10.1111/j.1755-6724.2007.tb00999.x
- Sangree, J. B., 1981. Use of Seismic Stratigraphy in Carbonate Rocks, Natuna D-Alpha Block Example. In: Zybura, F. J., ed., Proceedings of 10th Annual Convention Proceedings. Indonesian Petroleum Association, Indonesia, 135—152.
- Schlager, W., 1981. The Paradox of Drowned Reefs and Carbonate Platforms. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 92(4): 197—211. doi: 10.1130/0016-7606(1981)92<197:TPODRA>2.0.CO;2
- Sun, Z., Zhao, Z. X., Zhou, D., et al., 2011. The Stratigraphy and the Sequence Architecture of the Basins in Nansha Region. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(5): 798—806 (in Chinese with English abstract).
- Vahrenkamp, V. C., 1998a. Miocene Carbonates of Luconia Province, Offshore Sarawak: Implication for Regional Geology and Reservoir Properties from Strontium Isotope Stratigraphy. In: Teh, G. H., ed., Papers from Petroleum Geology Conference 1997, Seminar on Tertiary Basins of Peninsular Malaysia & Others. *Geological Society of Malaysia, Bulletin*, 42: 1—13.
- Vahrenkamp, V. C., 1998b. Sr-Isotope Stratigraphy of Miocene Carbonates, Luconia Province, Sarawak, Malaysia: Implications for Platform Growth and Demise and Regional Reservoir Behavior. In: Marshak, S., ed., Annual Meeting Expanded Abstracts—American Association of Petroleum Geologists, AAPG and Society for Sedimentary Geology, Tulsa.
- Vail, P. R., Audemard, F., Bowman, S. A., et al., 1991. The Stratigraphic Signatures of Tectonics, Eustasy and Sedimentation—An Overview. In: Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A., et al., eds., *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 617—659.
- Wilson, M. E. J., 2002. Cenozoic Carbonates in Southeast Asia: Implications for Equatorial Carbonate Development. *Sedimentary Geology*, 147(3—4): 295—428.
- Yao, Y. J., Wu, N. Y., Xia, B., et al., 2008. Petroleum Geology of the Zengmu Basin in the Southern South China Sea. *Geology in China*, 35(3): 503—513 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. J., Yang, C. P., Li, X. J., et al., 2013. The Seismic Reflection Characteristics and Tectonic Significance of the Tectonic Revolutionary Surface of Mid-Miocene (T3 Seismic Interface) in the Southern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(4): 1274—1286 (in Chinese with English abstract).
- Zampetti, V., Schlager, W., van Konijnenburg, J. H., et al., 2004. Architecture and Growth History of a Miocene Carbonate Platform from 3D Seismic Reflection Data; Luconia Province, Offshore Sarawak, Malaysia. *Marine and Petroleum Geology*, 21(5): 517—534. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2004.01.006
- Zhou, D., Sun, Z., Yang, S. K., et al., 2011. The Stratigraphic System of the Zengmu Basin, Southern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(5): 789—797 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 梅冥相, 1996. 淹没不整合型碳酸盐三级旋回层序——兼论碳酸盐台地的“凝缩作用”. *岩相古地理*, 16(6): 24—33.
- 孙珍, 赵中贤, 周蒂, 等, 2011. 南沙海域盆地的地层系统与沉积结构. *地球科学——中国地质大学学报*, 36(5): 798—806.
- 姚永坚, 吴能友, 夏斌, 等, 2008. 南海南部海域曾母盆地油气地质特征. *中国地质*, 5(3): 503—513.
- 姚永坚, 杨楚鹏, 李学杰, 等, 2013. 南海南部海域中中新世(T3界面)构造变革界面地震反射特征及构造含义. *地球物理学报*, 56(4): 1274—1286.
- 周蒂, 孙珍, 杨少坤, 等, 2011. 南沙海区曾母盆地地层系统. *地球科学——中国地质大学学报*, 36(5): 789—797.